

Savukaasupesurin taloudellinen kannattavuus kaukolämmön erillistuotannossa

Jussi Pahkamäki

Opinnäytetyö
syyskuu 2015

Energiatekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä Pahkamäki, Jussi	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 05.05.2015
	Sivumäärä 36	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: X
Työn nimi Savukaasupesurin taloudellinen kannattavuus kaukolämmön erillistuotannossa		
Koulutusohjelma Energiatekniikka		
Työn ohjaaja(t) Henell Antti		
Toimeksiantaja(t) Tulostekniikka Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyö tehtiin Tulostekniikka Oy:lle, joka toimittaa kotimaista polttoainetta käyttäviä lämpökeskuksia kotimaan markkinoille. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia savukaasupesurin käyttöä savukaasujen hukkalämmön talteenottoon ja hiukkaspäästöjen vähentämiseen. Tärkeämpänä tavoitteena pidettiin lämmön talteenottoa. Lisäksi perehdyttiin savukaasupesurin termodynaamiseen mitoitukseen ja savukaasupesurin jätevesiin liittyvään ympäristölainsäädäntöön.</p> <p>Työssä laadittiin tämä kirjallinen osana tämä opinnäytetyö, jossa kerrotaan perusteet savukaasupesuriprosessista, lainsäädännöstä ja taloudellisesta kannattavuudesta. Kirjallisen osuuden lisäksi laadittiin Excel-työkalu, jonka avulla voidaan arvioida laitoksen lämmöntalteenottopotentiaalia ja pesurin täytekappalepedin lämmönsiirtopinta-alaa ja täytekappaleiden määrää. Työssä myös saatiin selvitettyä käytetyn polttoaineen vaikutuksia savukaasupesurin toimintaan.</p> <p>Opinnäytetyön tärkein tulos on pesurin taloudellisen kannattavuuden osoittaminen. Tässä työssä esitellyillä tuloksilla voidaan tukea savukaasupesuri-investointia harkitsevaa asiakasta päätöksenteossa. Lisäksi työssä kerrotuilla termodynamiikan laskukaavoilla voidaan arvioida pesurin fyysiset mitat pesutornin valmistavaa alihankkijaa varten.</p> <p>Tehtyjen laskelmien perusteella savukaasupesuri on taloudellisesti kannattava investointi. Lisäksi tulevaisuudessa mahdollisesti tiukkenevien hiukkaspäästörajoitusten saavuttaminen vaatii savukaasujen puhdistuslaitteistoa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) savukaasupesuri, pesuri, lämmöntalteenotto, LTO, kaukolämpö, lämpökeskus, energiatehokkuus		
Muut tiedot		



Author Pahkamäki, Jussi	Type of publication Bachelor's thesis	Date 05.05.2015
	Pages 36	Language Finnish
		Permission for web publication X
Title Economic viability of flue gas scrubber in district heating plants		
Degree Programme Degree Programme in Energy Technology		
Tutor Henell Antti		
Assigned by Tulostekniikka Ltd		
<p>Abstract</p> <p>This thesis was done as an assignment for Tulostekniikka Ltd, a company that builds containerized district heating plants for domestic market. Goal of this thesis was to investigate economic benefits of using condensing flue gas scrubber to recover heat from flue gases and reducing particulate emissions. Heat recovery was give higher priority. Attention was also given to thermodynamics of flue gas scrubber and environmental legislation regarding condensers wastewater treatment.</p> <p>This thesis includes thermodynamic, chemical, technical and legal theory. Besides this written thesis an Excel tool was also made. This tool gives estimates regarding heat recovery potential and thermodynamic properties of the scrubber, including heat transfer coefficient, required surface area for heat transfer and required volume of packing materiel needed. Effects of used fuel was also considered.</p> <p>Most important result gained from this thesis was proof that condensing scrubber is economically viable investment. Customer who is considers to acquire scrubber can use this thesis as a reference material. Thesis also contains necessary formulas to calculate dimensions for scrubber column, to be used by subcontractor who constructs the column itself.</p> <p>According to calculations condensing flue gas scrubber is economically viable investment, with reasonably short payback time. One can safely assume that regulations regarding particulate matter emissions will tighten in the future. In order to meet these stricter norms flue gas treatment facilities may be necessary.</p>		
Keywords flue gas scrubber, scrubber, heat recovery, district heating, energy efficiency		

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	3
2 Työn toteutus	4
3 Viiden megawatin kaukolämpöjärjestelmä.....	4
3.1 Polttotekniikat	5
3.2 Kiinteä ja mekaaninen arina.....	6
3.3 Kattilan lämpöhäviöt.....	6
3.4 Kaukolämpöverkko.....	7
4 Savukaasupesurit	8
4.1 Palamisilman kostutuksella varustettu savukaasupesuri.....	10
4.2 Lämpöpumpulla varustettu savukaasupesuri	11
4.3 Lauhteenkäsittely	12
4.4 Savukaasupesurin vaikutus lämpölaitoksen hyötysuhteeseen	13
5 Palaminen	14
5.1 Palamisen perusteet.....	14
5.2 Kalorimetrinen ja tehollinen lämpöarvo	14
6 Savukaasut.....	15
6.1 Palamisilma	15
6.2 Savukaasujen kemiallinen koostumus	17
6.3 Vesihöyry	17
6.4 Rikin oksidit.....	18
6.5 Hiukkaspäästöt.....	18
6.6 Polttoaineen koostumuksen vaikutus savukaasupesurin lämmöntalteenottoon.....	19
7 Savukaasupesurin mitoitus.....	21
7.1 Lämmönsiirto savukaasupesurissa	22
7.2 Pakotettu konvektio.....	23
8 Lämmönsiirto lauhtumalla.....	26
8.1 Savukaasujen kosteus.....	26
8.2 Lauhtumisen lämmönsiirtokerroin.....	26
9 Lainsäädäntöä.....	27
10 Lämmön talteenotto 2,5 MW:n esimerkkilaitoksessa	29
11 Savukaasupesurin huolto.....	32
11.1 Pesutornin ja putkistojen huolto.....	33
11.2 Täytekappaleiden puhdistus.....	34
11.3 Lämmönvaihtimen puhdistus.....	34
11 Pohdintaa ja johtopäätökset.....	34

11.1 Työn itsearviointia	35
Lähdeluettelo.....	38

Kuviot

Kuvio 1. Lämpökattilan häviöt.....	7
Kuvio 2. Pesusuuttimet ja täytekappaleet.....	8
Kuvio 3. Savukaasupesurin toimintaperiaate.....	9
Kuvio 4. Alemman vesikierron suuttimet.....	10
Kuvio 5. Palamisilman kostutuksella varustettu savukaasupesuri.....	11
Kuvio 6. Lämpöpumpulla varustettu savukaasupesuri.....	12
Kuvio 7. Lauhteenkäsittelyn vaiheet.....	13
Kuvio 8. Puupolttoaineen kemiallinen koostumus.....	20
Kuvio 9. Palaturpeen kemiallinen koostumus.....	20
Kuvio 10. KL-veden paluulämpötilan ja polttoaineen kosteuden vaikutus lämmöntalteenottoon.....	30

Taulukot

Taulukko 1. Palamiseen osallistuvien alkuaineiden molekyylipainot.....	16
Taulukko 2. Tavanomaiset raja-arvot viemäriin johdettavalle teollisuusjätevedelle.....	29
Taulukko 3. Polttoaineiden hintataso.....	30
Taulukko 4. Savukaasun puhdistuslaitteiden tunnuslukuja.....	31
Taulukko 5. Ehdotus savukaasupesurin huoltojen ajoituksesta.....	32

Liitteet

Liite 1. Savukaasupesurin mitoitus- ja kannattavuuslaskelmat	USB-muisti
Liite 2. Esimerkkipesurille mitoitettujen levylämmönvaihtimen ominaisuudet.....	USB-muisti

1 Johdanto

Kaukolämmön tuotanto kotimaisella hakkeella, pelletillä ja turpeella öljyn sijaan on kasvanut räjähdysmäisesti 90- ja 2000 -luvulla. Tätä kehitystä ovat ajaneet huoli fossiilisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöjen aiheuttamasta ilmastonmuutoksesta ja öljyn kallistumisesta.

Kunnalliset lämpökeskukset käyttävät polttoaineenaan etupäässä edellä mainittuja kotimaisia polttoaineita kivihiilen jäädessä suurempien sähköä ja kaukolämpöä tuottavien yhteistuotantolaitosten polttoaineeksi. Kevyellä tai raskaalla polttoöljyllä kaukolämpöä tuotetaan vain kovimpina pakkasjaksoina tai häiriötilanteissa.

Pienet, muutaman megawatin laitokset ovat toistaiseksi päässeet vähällä ympäristölainsäädännön suhteen. Alle 5 MW:n puuta tai turvetta polttavien laitosten suurimmat sallitut hiukkaspäästöt ovat moninkertaiset suuriin teollisen mittakaavan laitoksiin verrattuna. Yleinen trendi ympäristölainsäädännössä on vaatimusten tiukkeneminen, ja pienten polttolaitosten päästörajat tulevat tuskin olemaan poikkeus.

Useimmat savukaasujen puhdistusratkaisut eivät varsinaisesti tee mitään muuta kuin puhdistavat savukaasuja. Samalla niiden käytöstä aiheutuu kustannuksia, joten ne ovat lämpöyrittäjälle taloudellinen rasite.

Savukaasupesurilla saadaan vähennettyä laitoksen hiukkaspäästöjä ja rikin oksidien päästöjä. Samalla saadaan otettua talteen savukaasujen hukkalämpöä ja voidaan käyttää kosteampaa polttoainetta. Tämä tekee savukaasupesuri-investoinnista houkuttelevan.

Tämän työn toimeksiantajana oli Kyyjärvellä sijaitseva Tulostekniikka Oy, joka toimittaa pienehköjä lämpökeskuksia noin 1-5 MW:n kokoluokassa. Laitokset soveltuvat kokonsa puolesta tuottamaan lämpöä teollisuushalleihin, kasvihuoneisiin tai pieniin taajamiin.

Työn tavoitteena oli tarkastella savukaasupesurin taloudellista kannattavuutta pienille lämpökeskuksille, asiaan liittyvää ympäristölainsäädäntöä sekä perehtyä savukaasupesurin prosessin toimintaan.

2 Työn toteutus

Tämä opinnäytetyö on luonteeltaan tekninen kirjallisuusselvitys, jota hyödyntävä toimeksiantaja voi perustella savukaasupesuri-investointia harkitsevalle asiakkaalle pesurin hankinnan kannattavuutta. Lisäksi työssä käsitellään joitain savukaasupesurin prosessin kannalta tärkeitä prosessilaitteita, komponentteja ja savukaasupesurin mitoittamiseen liittyvää fysiikkaa.

Savukaasupesurin lämmönsiirron mallintamisen ja lämmöntalteenottopotentialin lähdeteokset ovat etupäässä termodynamiikan, lämmönsiirron ja virtaustekniikan oppikirjoja. Savukaasupesureiden käytöstä lämmön talteenottoon lähteenä käytettiin savukaasupesuritoimittajien esitteitä, energia-alan julkaisuissa olleita aiheeseen liittyviä artikkeleita ja höyrykattilatekniikan sekä voimalaitostekniikan oppikirjoja.

Omaa työkokemusta hyödynsin savukaasupesurin toimintaa ja rakennetta käsittelevässä kappaleessa sekä huollossa. Savukaasupesurin toimintaan tutustuessani havaitsin että se vastaa rakenteeltaan lähes täysin sellutehtailta löytyviä hönkäpesureita, kuten esimerkiksi soodakattilan liuottajan hönkäpesuria.

Opinnäytetyön tietoperustan perusteella tehtiin laskelmat, joiden avulla voidaan arvioida lämmöntalteenottopotentialia ja pesurin mitoittamista. Laskelmat suoritettiin Excelillä.

3 1 – 5 megawatin kaukolämpöjärjestelmät

Viiden megawatin lämpölaitoksia omistavat ja käyttävät kunnat, lämpöyhtiöt ja energiaosuuskunnat. Laitokset toimivat miehittämättömänä. 5 MW:n kaukolämpölaitokset valikoituivat tarkempaan käsittelyyn siksi, että niihin

liittyvä lainsäädäntö jättää ne useiden päästö- ja ympäristösäädösten ulkopuolelle.

3.1 Polttotekniikat

5 MW:n mittakaavassa ylivoimaisesti suosituin polttotekniikka on arinapoltto (Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5-30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. 2012). Arina on kiinteä tai mekaaninen alusta, jonka päällä kiinteä polttoaine poltetaan. Arinaa täytyy usein jäähdyttää vaurioitumisen estämiseksi. Pienissä kattiloissa käytetään ilmajäähdytteisiä arinoita, joissa palamisilma jäähdyttää arinaa. Suurten kattiloiden arinat ovat usein vesijäähdytteisiä ja kuuluvat kattilan vesikiertoon. Arinapoltto sopii hyvin kiinteille polttoaineille, kuten puulle ja turpeelle, mutta vaatii sen että polttoaineen tuhkapitoisuus on kohtuullisen pieni. Arina voi tukkeutua kuumasta, pehmeästä tuhkasta. (Huhtinen, ym. 2000. 146)

Arinalla tapahtuva palamisprosessi voidaan yksinkertaistaa muutamaa vaiheeseen. Arinan alku- tai syöttöpäässä polttoaine kuivuu. Tämän jälkeen polttoaine alkaa kaasuuntua, eli polttoaineen haihtuvat aineet kaasuuntuvat ja syttyvät palamaan. Kaasuuntuvien aineiden palaessa vapauttama lämpö sytyttää myös haihtumattomat palavat aineet. Lopuksi tuhka poistuu arinan loppupäästä. (Huhtinen, ym. 2000. 83)

Arinapoltto mahdollistaa suurenkin palakoon polttoaineen käyttämisen. Huonoina ominaisuuksina voidaan pitää hidasta säädettävyyttä ja herkkyyttä palakoon vaihteluille. Lisäksi arinapoltossa syntyy suuria häviöitä epätäydellisen palamisen vuoksi. Osa palavasta aineesta poistuu pohjatuhkan mukana tai palaa epätäydellisesti ja poistuu hiilimonoksidina savupiippuun. Lisäksi arinapoltto vaatii suurehkon ilmaylimäärän. Tämä lisää savukaasuhäviöitä. (Jalovaara, ym. 2003. 29-32)

3.2 Kiinteä ja mekaaninen arina

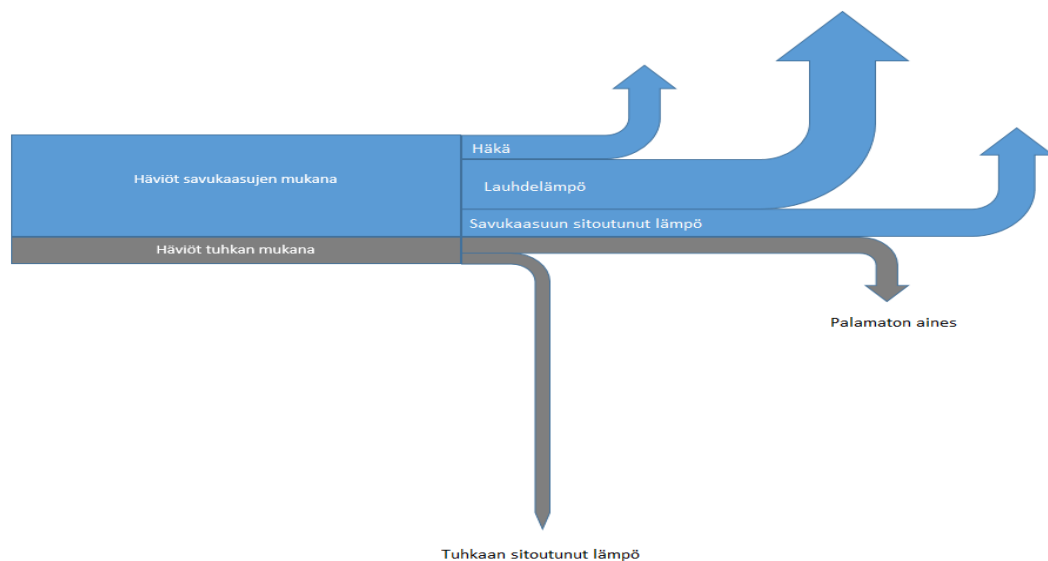
Arinaa kallistamalla saadaan aikaan sen että polttoaine kulkee painovoiman vaikutuksesta arinan ylitse. Eri polttoaineet vaativat eri kallistuskulman ja kallistuskulma voi olla eri suuruinen arinan eri osissa. (Huhtinen, ym. 2000. 147)

Mekaanisella viistoarinalla polttoaine saadaan liikkumaan arinalla joko liikuttamalla arinan rakenteita tai täryttämällä arinaa. Koska polttoainetta liikutetaan koneellisesti, mekaanista arinaa ei tarvitse rakentaa yhtä kaltevaksi kuin kiinteää arinaa. (Huhtinen, ym. 2000. 148)

3.3 Kattilan lämpöhäviöt

Kattilassa syntyvät lämpöhäviöt vähentävät hyödyksi saatavan energian määrää. Lämpöhäviöt voidaan jaotella palamattomien häviöihin, säteily- ja johtumishäviöihin sekä savukaasuhäviöihin. (ks. kuva 1) Palamattomien häviöt koostuvat palamatta jääneestä polttoaineesta joka poistuu tuhkan mukana ja epätäydellisessä palamisessa syntyvästä häästä. Säteily- ja johtumishäviöt koostuvat kattilan pinnasta ulkoilmaan siirtyvästä lämmöstä. Lisäksi tuhka varaa itseensä lämpöenergiaa joka menetetään tuhkan mukana. (Huhtinen, ym. 2000. 104) Savukaasupesuri ottaa talteen savukaasujen mukana

normaalisti poistuvaa hukkalämpöä, joten mielenkiinto kohdistetaan savukaasuhäviöihin. Kuviossa 1 on esitetynä erilaiset lämpöhäviöt. Johtumis- ja säteilyhäviöt on jätetty pois, eikä kuva ole mittakaavassa.



Kuvio 1. Lämpökattilan häviöt. (Huhtinen, ym. 2000)

Savukaasujen mukana hukataan energiaa kolmella tavalla: häkänä, savukaasujen varaamana lämpönä ja vesihöyryn lauhdelämpöä.

3.4 Kaukolämpöverkko

Tavallisessa kunnallisessa kaukolämpöverkossa lämpö siirretään asiakkaalle putkea pitkin kuumana vetenä. Kaukolämmön siirtoverkko koostuu tuotantolaitoksen kaukolämmönvaihtimesta, pumpuista, menoputkistosta, asiakkaan lämmönvaihtimesta, paluuputkistosta ja tarvittavasta instrumentoinnista.

Tavallisesti kaukolämmön erillistuotannossa verkon paluulämpötilalla ei ole ollut merkitystä laitoksen hyötysuhteen kannalta. Kappaleista 7 ja 8 löytyvien laskukaavojen avulla voidaan havaita että hyvä savukaasupesurin toiminta vaatii sen että kaukolämmön paluuvesi palaa takaisin mahdollisimman alhaisessa lämpötilassa. Sähkön ja kaukolämmön yhteistuotannossa suurin hyötysuhde sähkön tuotannossa saavutetaan, kun paluuveden lämpötila on mahdollisimman alhainen.

4 Savukaasupesurit

Savukaasupesuri on torni joka on täytetty lämmönsiirtopinta-alaa lisäävillä täytekappaleilla. Savukaasut johdetaan savukaasupesuriin sen alaosasta. Pesurin yläosassa täytekappalepedin yläpuolella on suuttimet, joista ruiskutetaan vettä täytekappaleiden päälle. (ks. kuvio 2.) Ylöspäin virtaava savukaasu kohtaa alaspäin täytekappaleiden pinnoilla valuvan veden, jolloin savukaasu jäähtyy ja siinä oleva vesihöyry lauhtuu vedeksi. Lisäksi savukaasuissa oleva lentotuhka sitoutuu veteen ja valuu sen mukana kolonnin pohjalle. Pohjalle saostunut lentotuhka voidaan poistaa pesurin pohjalta muotoilemalla pohja suppilomaiseksi. Suppilon-osan pohjalta liete voidaan poistaa esimerkiksi letkupumpulla, joka soveltuu lietteiden pumppaamiseen.

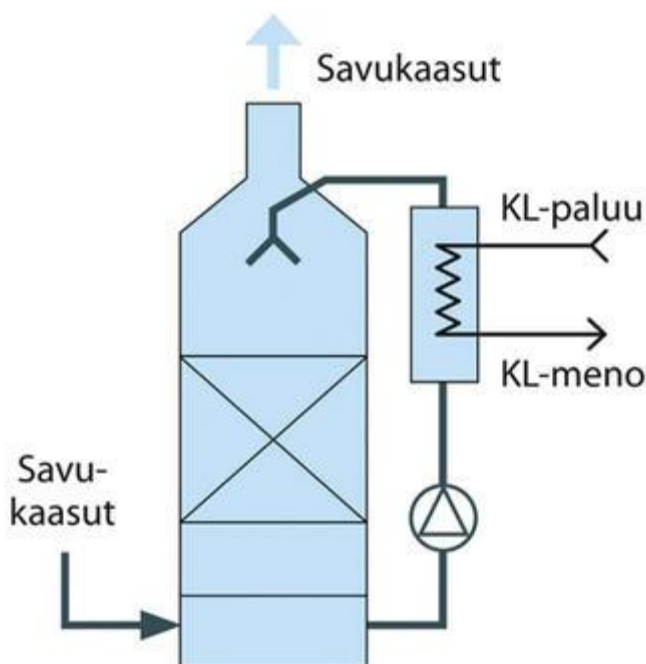


Kuvio 2. Pesusuuttimet ja täytekappalepeti

Pesurin alaosasta kiertovesi pumpataan lämmönvaihtimen läpi, jossa kiertovesi luovuttaa lämpönsä kaukolämpöverkon paluuveteen. Tämän jälkeen kaukolämpövesi syötetään esilämmitettynä kaukolämmönvaihtimelle,

kiertovesi pumpataan takaisin pesurin yläosaan. Savukaasupesurin periaatteellinen rakenne on esitetty kuviossa 3.

Pesurin tornirakenteen, eli kolonnin, mitat määräytyvät savukaasujen virtauksen ja lämpötilan mukaan. Karkeasti voidaan todeta että pesurin halkaisijan sanelee pesuveden pisarakoko ja korkeuden savukaasujen sisältämä energiamäärä. Kolonnin fyysiseen mitoittamiseen tarvittavat laskukaavat löytyvät kappaleesta 7.

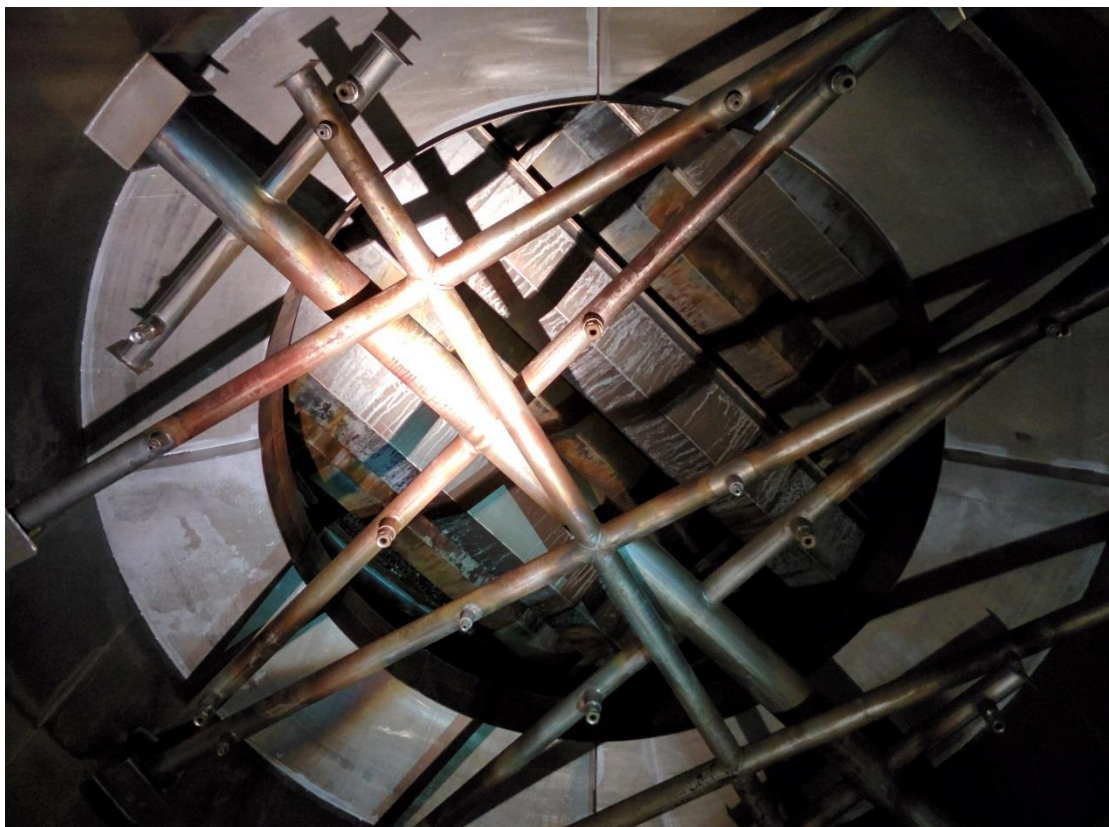


Kuvio 3. Savukaasupesurin toimintaperiaate (Järvenreuna & Nummila)

Savukaasupesurissa savukaasun lämpötila laskee alle happokastepisteen. Tästä syystä pesurin kiertoveden pH on pidettävä sopivalla tasolla syöttämällä veteen emäksistä kemikaalia, esimerkiksi lipeää. Koska savukaasujen lämpötila laskee happokastepisteen alapuolelle, on pesuri putkistoinen sekä savupiippu rakennettava sellaisesta materiaalista joka kestää savukaasuista lauhtuvan happaman lauhteen.

Pesurin alaosassa savukaasujen sisääntuloyhteen ja täytekappalepedin välissä on usein yksi vesikierto lisää. Tämän vesikierron suihkuttama vesisumu sitoo osan savukaasujen sisältämistä hiukkasista ja huuhtoo ne

pesurin pohjalle ennen kuin ne joutuvat täytekappalepetiin. (ks. kuvio 4.) Tämä estää hiukkasia joutumasta petiin ja tukkimasta sitä.



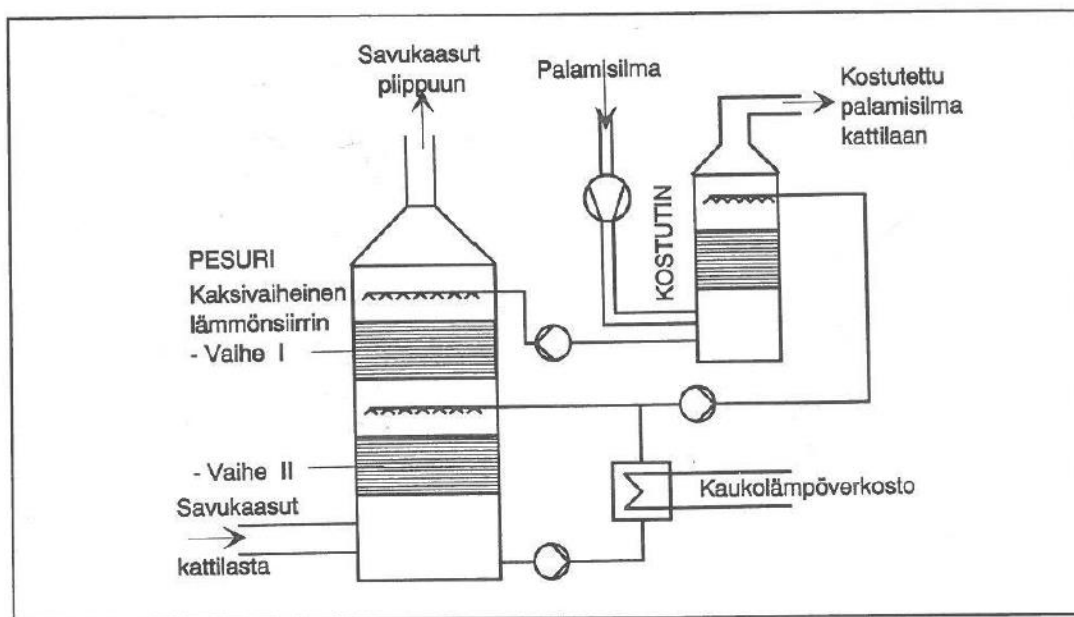
Kuvio 4. Alemman vesikierron suuttimet

Täytekappaleet ovat metallista, keraamisesta materiaalista tai muovista valmistettuja kappaleita, jotka lisäävät pesurin lämmönsiirtopinta-alaa. Valittujen täytekappaleiden ominaisuudet vaikuttavat savukaasupesurin kokoon, painehäviöön ja lämmönsiirtoon.

4.1 Palamisilman kostutuksella varustettu savukaasupesuri

Savukaasujen kosteutta voidaan nostaa korkeammaksi kostuttamalla kattilan palamisilmaa. Samalla savukaasujen kastepiste nousee korkeammaksi, jolloin lauhdelämpöä saadaan talteen korkeammassa lämpötilatasossa. Palamisilma kostutetaan johtamalla palamisilma savukaasupesuria rakenteeltaan muistuttavan kolonnin läpi. Kostuttimessa palamisilma virtaa ylöspäin samanlaisessa täytekappalepedissä kuin savukaasupesurissakin. Pedin

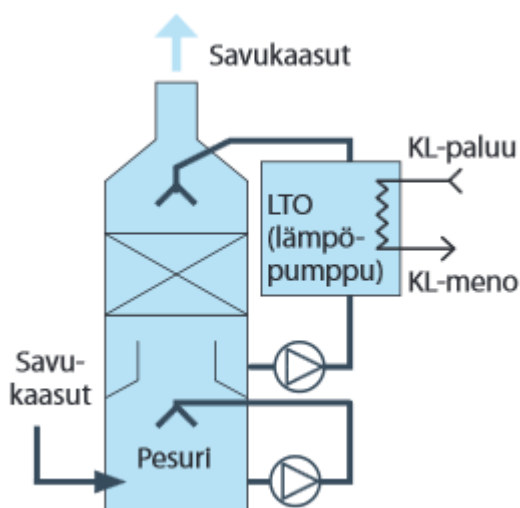
päälle ruiskutetaan kostutukseen käytettävä vesi, joka kostuttimen jälkeen johdetaan jäähtyneenä savukaasupesurin yläosaan. (Ks. kuvio 5) Tällä kytkennällä saadaan pesurista suurempi lämpöteho talteen, koska pesuriin tulevaa pesuvettä on jäähdytetty kostuttimessa ja samaan aikaan savukaasujen kastepistettä on saatu nostettua. (Huhtinen, ym 2000, 255)



Kuvio 5. Palamisilman kostutuksella varustetun savukaasupesurin toimintaperiaate (Huhtinen, ym. 2000)

4.2 Lämpöpumpulla varustettu savukaasupesuri

Savukaasupesurin lämmöntalteenottoa voidaan tehostaa jäädyttämällä kaukolämmön paluuvettä lämpöpumpulla. Tällä tavalla saadaan laskettua pesuriin menevän pesuveden lämpötilaa jopa 20 celsiusasteella verrattuna perinteiseen pesuriin, jolloin lämmön talteenotto tehostuu. Lämpöpumppu tehostaa pesurin toimintaa erityisesti sellaisina aikoina, jolloin kaukolämmön paluuveden lämpötila on koholla. Lämpöpumpulla tehostettun savukaasupesurin periaate kuviossa 6 (Järvenreuna & Nummila)

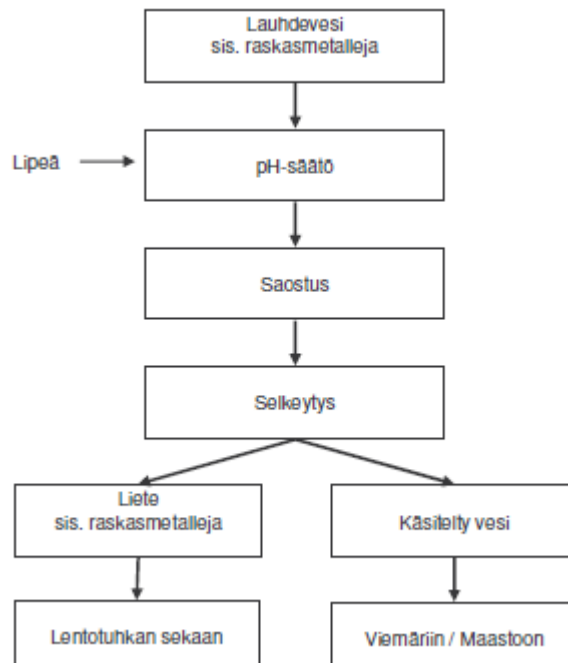


Kuvio 6. Lämpöpumpulla varustettu savukaasupesuri (Järvenreuna, Nummila. n.d.)

4.3 Lauhtenkäsittely

Savukaasuista lauhtuva vesi johdetaan pois pesurista. Savukaasupesurista poistuva vesi voidaan poistaa ylikaaatona tai lämmönvaihtimen jälkeen. Lämmönvaihtimen jälkeinen lauhteenpoisto on energiatehokkaampi, sillä lauhde on ehtinyt luovuttaa energiansa hyötykäyttöön lämmönvaihtimessa. Poistuva lauhde selkeytetään ja suodatetaan ennen johtamista viemäriin. (ks. kuvio 7)

Pesurin pohjalle saostuu lentotuhkan ja veden muodostamaan lietettä joka voidaan pumpata tuhkalavalle tai kattilan tuhkakaukaloon, jos kyseisen laitoksen kattilassa on märkätuhkaus. Kaikki pesurin erottama kiintoaine ei kuitenkaan saostu pesurin pohjalle, vaan osa kiertää pesuveden mukana takaisin täytekappalepedin päälle



Kuvio 7. Lauhteenkäsittelyn vaiheet (Alle 50MW:n lämpölaitosten teollisuusjätevesiselvitys, 2008.)

4.4 Savukaasupesurin vaikutus lämpölaitoksen hyötysuhteeseen

Polttoaineen mukana tuleva vesi ja polttoaineen sisältämän vedyn palaessa syntyvä vesi sitovat energiaa höyrystyessään. Vesihöyry sitoo itseensä höyrystymislämmön verran energiaa, veden höyrystymislämmön ollessa 2260 kJ/kg. Puupolttoaineen kosteus on usein n. 50 %, joten suuri osa polttoaineen palaessa vapautuvasta energiasta kuluu veden höyrystämiseen. Jos savukaasut johdetaan suoraan piippuun ilman savukaasujen lauhdutusta, veden höyrystämiseen sidottu energia menetetään.

Huhtisen, ym höyrykattilatekniikka -teoksessa hyötysuhteen laskennassa käytetään saksalaista DIN 1942 – standardia, jossa käytetään polttoaineen lämpöarvona tehollista lämpöarvoa. Tehollinen lämpöarvo ei ota huomioon höyryn lauhtumisessa vapautuvaa energiaa. Tästä syystä savukaasupesurilla varustetulla lämpölaitoksella on mahdollista saavuttaa teoriassa yli 100% hyötysuhde. Sekaannusten välttämiseksi on hyvä kertoa kattilalaitoksen hyötysuhde ja lämpötehot siten, että kattilan ja pesurin tiedot erotetaan toisistaan.

5 Palaminen

5.1 Palamisen perusteet

Palaminen tarkoittaa aineen yhtymistä happeen, jolloin vapautuu lämpöä. Palamisessa vapautuva lämpöenergia on jokaiselle alkuaineelle ominainen ominaisuus. Palamisen laskennallisen mallintamisen kannalta oleelliset polttoaineen komponentit ovat hiili, vety, rikki, typpi, vesi ja tuhka. Kun polttoaineen kemiallinen koostumus tunnetaan, voidaan sen avulla laskea polttoaineen lämpöarvo ja savukaasujen koostumus. (Huhtinen, ym. 2000. 80-84)

Täydellisessä palamisessa happea on juuri oikea määrä palamisreaktioita varten, eikä savukaasuissa ole happea. Tällaista palamista kutsutaan stoikiometriseksi palamiseksi. Todellisuudessa palamisilmaa on syötettävä kattilaan enemmän, jotta saavutettaisiin täydellinen palaminen. Todellisen palamisilmamäärän suhdetta stoikiometrisen palamisen vaatimaan ilma-, ja sitä kautta happimäärään, kuvataan ilmakertoimella (λ). Puulle tyypillinen ilmakerroin on 1,15–1,5, eli palamisilmaa syötetään 1,15–1,5 kertainen määrä stoikiometriseen palamiseen verrattuna. Turpeelle ilmakerroin on tyypillisesti 1,15–1,35. (Huhtinen, ym. 2000. 86)

Savukaasut koostuvat pääasiassa hiilidioksidista, vesihöyrystä ja palamisilman mukana tulleesta tuesta joka ei ole reagoanut tulipesässä. Savukaasu sisältää pienemmissä määrin rikin ja typen oksideja ja hiukkasia. Hiukkaspäästöt koostuvat pääasiassa hienojakoisesta lentotuhkasta ja palamatta jääneistä polttoaineihiukkasista. (Huhtinen, ym. 2000. 87-90)

5.2 Kalorimetrinen ja tehollinen lämpöarvo

Lämpöarvo kuvaa polttoaineen palamisessaan vapauttaman lämpöenergian määrän massa- tai tilavuusyksikköä kohden. Lämpöarvo voidaan mitata kokeellisesti pommikalorimetrillä. Kalorimetrissä näyte poltetaan veden ympäröimässä säiliössä. Näyte palaa puhtaasti ja palamiskaasut jäähdytetään 25 °C lämpötilaan. Tällöin myös polttoaineen palaessa höyrystynyt vesi ja

vedyn palamisessa muodostunut vesi lauhtuvat takaisin vedeksi vapauttaen höyrystymislämpönsä verran (2260 kJ/kg) lämpöenergiaa.

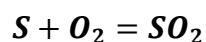
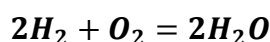
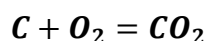
Todellisuudessa teollisuudessa käytetään polttoaineiden lämpöarvona lähes aina tehollista lämpöarvoa, joka saadaan vähentämällä veden höyrystymislämpö kalorimetrisestä lämpöarvosta.

6 Savukaasut

Savukaasujen kemiallinen koostumus on helppo määrittää laskennallisesti hiilidioksidin, rikkidioksidin, vesihöyryn, typen ja jäänöshapen osalta. Koska pesurin toiminta riippuu savukaasujen määrästä ja kosteudesta, mielenkiinto keskitetään niihin.

6.1 Palamisilma

Savukaasujen koostumusta ja määrää laskettaessa on tiedettävä polttoaineen kemiallinen koostumus, tarvittava palamisilman määrä ja haluttu lämpöteho. Polttoaineen alkuainekomponenttien stoikiometriseen palamiseen vaadittava hapen ainemäärä saadaan palamisen reaktioyhtälöistä:



Komponentin ainemäärä polttoainekiloa kohden lasketaan taulukon 1 mukaan (Huhtinen, ym. 2000)

Taulukko 1. Palamiseen osallistuvien alkuaineiden molekyylipainot (Huhtinen, ym. 2000)

Komponentti	Komponentin määrä g/kgpa	Molekyylipaino kg/kmol	Komponentin määrä mol / kgpa
C (hiili)	W_C	12,01	$n_C = W_C / 12,01$
H ₂ (vety)	W_{H_2}	2,016	$n_{H_2} = W_{H_2} / 2,016$
S (rikki)	W_S	32,06	$n_S = W_S / 32,06$
O ₂ (happi)	W_{O_2}	32,00	$n_{O_2} = W_{O_2} / 32,00$

Polttoaineen palamiseen vaadittava hapen ainemäärä saadaan laskettua kaavalla 1.

$$\frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} = n_C + 0,5 * n_{H_2} + n_S - n_{O_2} \quad (1)$$

missä

- $N_{O_2(teor)}$ on stoikiometriseen palamiseen vaadittu hapen ainemäärä (mol/kgpa)
- m_{pa} on polttoaineen massa (kg)
- n_C on hiilen ainemäärä (mol/kgpa)
- n_{H_2} on vedyn ainemäärä
- n_{O_2} on polttoaineen sisältämän hapen ainemäärä

Palamisen kannalta ilma koostuu hapesta ja tuestä, joka ei tässä laskentatavassa osallistu palamiseen. Tusten osuuteen on lisätty myös muut kaasut, esim argon. (Huhtinen, 2000. 85) Ilmasta 21 % on happea ja 79 % tustea. Teoreettinen palamisilmamäärä lasketaan kaavalla 2.

$$\frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} = \frac{1}{0,21} * \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} = 4,76 * \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} \quad (2)$$

Edellinen kaava antaa tarvittavan ilmamäärä yksikössä mol/kgpa. Jos tulos halutaan grammoina, saatu moolimäärä kerrotaan ilman molekyylipainolla 28,96 g/mol. Jos yksiköksi halutaan litroja, on ilman moolimäärä kerrottava ilman moolitilavuudella 22,40 l/mol. (Huhtinen, ym 2000, 85)

Todellinen ilmamäärä saadaan kaavalla 3, ilman ainemäärän sijasta voidaan käyttää myös massaa tai tilavuutta.

$$N_{i(tod)} = N_{i(teor)} * \lambda \quad (3)$$

6.2 Savukaasujen kemiallinen koostumus

Polttoaineen komponenttien palamisessa syntyvien palamiskaasujen ainemäärä saadaan edellisessä kappaleessa mainituista palamisyhtälöistä. Syntyvän savukaasun määrä stoikiometrisessä palamisessa lasketaan kaavalla 4.

$$\frac{N_{sk(teor)}}{m_{pa}} = n_c + n_{H_2} + n_s + 3,76 * \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} + n_N + n_{H_2O}, \quad (4)$$

Jos halutaan savukaasujen määrä kilogrammoina, kerrotaan komponenttinen ainemäärät niiden molekyylipainoilla. Jos savukaasujen määrä halutaan litroina, kerrotaan ainemäärät moolitilavuuksilla, joka on useimmille kaasuille riittävällä tarkuudella 22,4 l/mol.

Kun stoikiometrisen palamisen synnyttämä teoreettinen savukaasumäärä tunnetaan, voidaan todellinen savukaasumäärä halutulle ilmakertoimelle laskea kaavalla 5.

$$\frac{N_{sk(tod)}}{m_{pa}} = \frac{N_{sk(teor)}}{m_{pa}} + (\lambda - 1) * \frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} \quad (5)$$

6.3 Vesihöyry

Koska savukaasujen sisältämä vesihöyry on savukaasupesurin lämmöntalteenoton kannalta oleellinen tieto, on savukaasujen kosteus ja kastepiste tiedettävä ja niiden vaikutus laitteiston toimintaan ymmärrettävä. Savukaasujen sisältämän veden määrä lasketaan kaavalla 6.

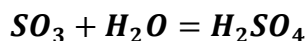
$$\frac{N_{höyry}}{m_{pa}} = n_{H_2} + n_{kosteus} + n_{H_2O(ilma)}, \quad (6)$$

missä

- n_{H_2} on polttoaineen sisältämän vedyn määrä
- $n_{kosteus}$ on polttoaineen sisältämän veden määrä
- $n_{H_2O(ilma)}$ on palamisilman mukana tulevan veden määrä

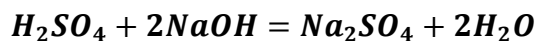
6.4 Rikin oksidit

Osa rikin palamisessa syntyneestä rikkidioksidista (SO_2) hapettuu edelleen rikkiatrioksidiksi (SO_3). Kun rikkiatrioksidi reagoi savukaasujen sisältämän vesihöyryn kanssa, syntyy rikkihappoa.



Energiateollisuus ry:n ja ympäristöministeriön julkaisu kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5-30 MW kattilalaitosten teknisistä ratkaisuista sekä palamisen hallinnasta puolestaan antaa syntyvän rikkidioksidin määräksi 1-5% syntyvästä rikkidioksidista. Puun ja turpeen yhteispoltto kuitenkin vähentää rikkihapon haittavaikutuksia laitteistoon, koska puun poltossa syntyvä tuhka sitoo turpeen rikkiä. Samalla myös hiukkaspäästöt pienenevät. (Mts. 7) Turpeen palaessa muodostuu rikkidioksidia 200-300mg/MJ laitoksen koosta, iästä, teknisistä ratkaisuista ja polttoaineen ominaisuuksista riippuen. (Jalovaara 2012. 97)

Savukaasuista lauhtuvan rikkihapon neutraloituessa syntyy vettä ja natriumsulfaattia, eli glaubersuolaa. Lauhteessa olevalla suolalla ei liene ympäristönsuojelullista merkitystä sen vähäisen määrän vuoksi.



Savukaasupesuri poistaa savukaasujen rikkidioksidista 80-98% ja suolahaposta 70-98%. (Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5-30MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. 2012, 22)

6.5 Hiukkaspäästöt

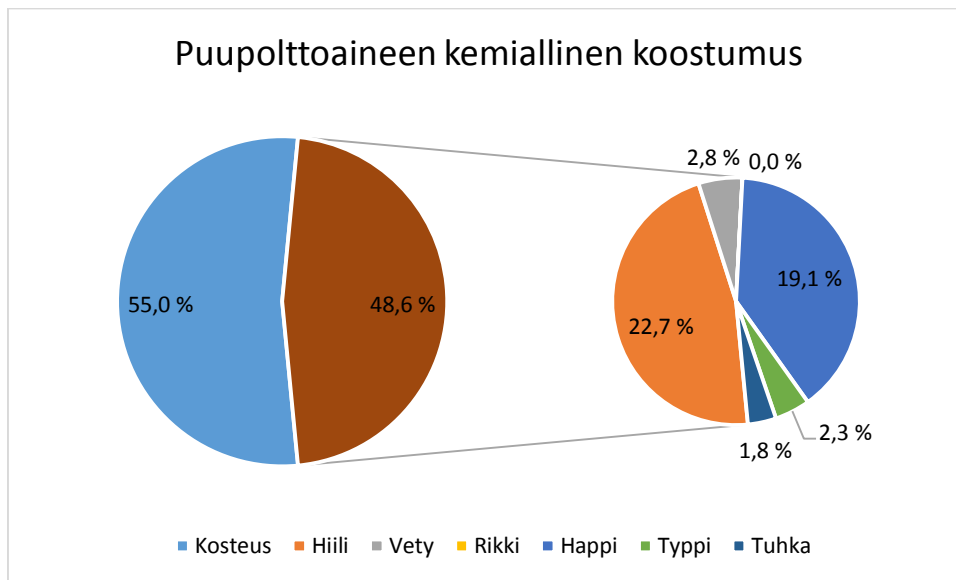
Pienten, kotimaista polttoainetta käyttävien lämpölaitosten polttotekniikkana arinapoltto on yleisin polttotekniikka ja laajalti käytössä. (Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5-30MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. 2012, 16). Tulostekniikka Oy:n toimittamat laitokset ovat pääasiassa pienen mittakaavan laitoksia, joiden polttotekniikka on arinapoltto.

Arinakattilan hiukkaspäästöt ilmaan ovat pienet, sillä suuri osa tuhkasta poistuu arinan läpi. Yhdessä syklonin ja savukaasupesurin kanssa saadaan

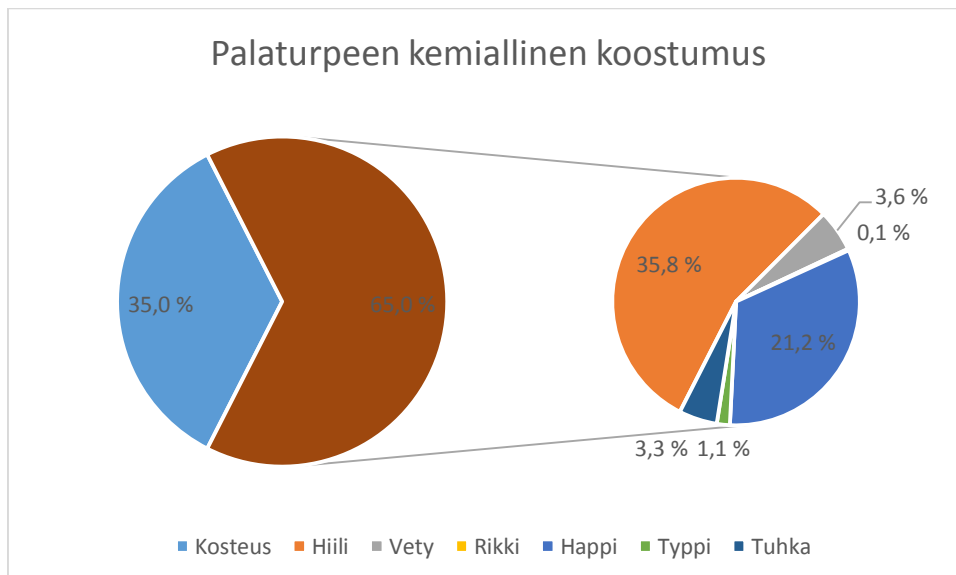
aikaan hyvin suuri erotusaste hiukkasille. Pelkkä pesuri on kuitenkin keuhko valinta ainoaksi hiukkassuodattimeksi. Kun pesuriin päätyy paljon lentotuhkaa, tarvitaan lauhteen käsittelyyn huomattavasti kalliimmat ja järeämmät puhdistuslaitteet. (Huhtinen, ym. 2000. 255) Kattilalaitoksessa kannattaa siis savukaasupesurin lisäksi olla sykloni, jolla erotetaan osa lentotuhkasta ennen savukaasupesuria. Tällä tavalla kevennetään savukaasupesurin hiukkaskuormitusta ja sitä kautta saavutetaan yksinkertaisempi ja edullisempi rakenne.

6.6 Polttoaineen koostumuksen vaikutus savukaasupesurin lämmöntalteenottoon

Savukaasupesurin kannalta suurin merkitys on polttoaineen kosteudella ja polttoaineen sisältämällä vedyllä, joka muodostaa palaessaan vettä. Havaittiin että turpeen ja puun kuiva-aineen kemialliset koostumukset eivät eroa toisistaan niin paljoa että niillä olisi suurta merkitystä lämmön talteenotossa. (ks. kuva 8 ja 9) Suurempi merkitys on polttoaineen kosteudella, sillä suuri polttoaineen kosteus nostaa savukaasujen kastepistettä, jolloin lämpö saadaan talteen korkeammassa lämpötilatasossa. Puupelletin kosteus on huomattavasti haketta alhaisempi, noin 10 %. Koska polttoaine on kuivaa, myös savukaasut ovat kuivia, jollei erillistä palamisilman kostutuslaitteistoa ole rakennettu. Tämän perusteella voidaan sanoa että savukaasupesurin hankintaa pellettiä pääasiallisena polttoaineena käyttävään laitokseen on hankala perustella lämmöntalteenoton tuomilla säästöillä.



Kuvio 8. Puupolttoaineen kemiallinen koostumus (Huhtinen, ym. 2000)



Kuvio 9. Turpeen kemiallinen koostumus (Huhtinen, ym. 2000)

Yllä olevat polttoaineen kemiallista koostumusta kuvaavat diagrammit ovat vain viitteellisiä. Polttoaineiden kosteus vaihtelee paljon, mutta kuiva-ainekoostumus pysyy pääosin samana.

7 Savukaasupesurin mitoitus

Savukaasujen virtausnopeuden on oltava pienempi kuin pesuveden muodostaman pisaran terminaalinopeus. Jos savukaasujen nopeus on tätä suurempi, vesipisara leijuu ja voi jopa kulkeutua pois savukaasupesurista. Terminaalinopeus lasketaan kaavalla 7.

$$V_r = \sqrt{\frac{2mg}{C_v \rho A}} \quad (7)$$

missä

- m on pisaran massa
- g on putoamiskiihtyvyys
- C_v on ilmanvastuskerroin
- ρ on savukaasujen tiheys
- A pisaran kohtisuora pinta-ala (etukuvanto)

Kun suurin mahdollinen nopeus savukaasuille tiedetään, voidaan sen ja savukaasujen tilavuusvirran avulla määritellä pienin mahdollinen halkaisija savukaasupesurin rungolle. Pienin mahdollinen halkaisija lasketaan kaavalla 8.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{v}}{\pi V_r}} \quad (8)$$

missä

- D on savukaasupesurin halkaisija
- \dot{v} on savukaasujen tilavuusvirta
- V_r on savukaasujen terminaalinopeus

Savukaasujen nopeutta ei voida hidastaa muuten kuin suurentamalla pesurin halkaisijaa, sillä savukaasujen tilavuusvirta ja sitä kautta nopeus riippuu

tarvittavasta kaukolämmön tehosta. Savukaasupesurin halkaisijaa rajoittavat myös valmistustekniset syyt, kuten käytössä olevilla työstökoneilla valmistettavan suurimman mahdollisen putkiaiheen koko tai käytössä oleva kuljetuskalusto.

Kun savukaasupesurin halkaisija on valittu, saadaan savukaasujen nopeus laskettua kaavalla 9.

$$V = \frac{\dot{v}}{A}$$

missä (9)

- V on savukaasujen nopeus
- \dot{v} on savukaasujen tilavuusvirta
- Savukaasupesurin poikkipinta-ala m^2

Täytekappaleet täyttävät 5% - 35% täytekappalepedin tilavuudesta, jolloin savukaasun virtaukselle jää vain osa pesurin halkaisijasta. Reynoldsin luvun laskentaa varten täytyy laskea välitilanopeus V_s . (Wagner 1994. 76)
Välitilanopeus lasketaan kaavalla 10.

$$V_s = \frac{\Phi}{V} \quad (10)$$

- V_s on savukaasujen välitilanopeus m/s
- Φ on huokoisuus
- V on savukaasujen nopeus, m/s

7.1 Lämmönsiirto savukaasupesurissa

Savukaasupesurin lämmönsiirto tapahtuu pääasiassa kahdella tavalla. Pesurin alaosassa lämmönsiirto tapahtuu pakotetulla konvektiolla kuumista savukaasuista kiertoveteen. Kun ylöspäin nousevat savukaasut ovat jäähtyneet kastepisteeseensä ne alkavat lauhtua.

Täytekappaleet ovat varsin epäsäännöllisen muotoisia ja asettuvat mielivaltaisiin asentoihin savukaasuvirtaan nähden. Tästä syystä lämmönsiirtokertoimen täsmällinen laskeminen on hyvin hankalaa. Tässä opinnäytetyössä esitetyllä tavalla voidaan tehdä perusteltu arvio

lämmönsiirtokertoimesta. Myöhemmin tarvittavien täytekappaleiden määrää voidaan täsmentää kokemusten perusteella.

7.2 Pakotettu konvektio

Konvektioksi tai kuljettumiseksi kutsutaan lämmönsiirron muotoa, jossa liikkuva neste tai kaasu siirtää lämpöä. Luonnollisessa konvektiossa liike syntyy siitä että lämpimän fluidin tiheys on pienempi ja se pyrkii nousemaan ylöspäin ja kylmä, tiheämpi fluidi laskeutuu alaspäin. Pakotetussa konvektiossa, jollaista konvektiivinen lämmönsiirto savukaasupesurissakin on, fluidin liikettä tehostetaan pumpulla tai puhaltimella. Savukaasupesurin tapauksessa pakotetun konvektion vaatima liike saadaan aikaan savukaasupuhaltimella.

Konvektiivista lämmönsiirtoa kuvataan lämmönsiirtymiskertoimella h_{cond} , joka kuvastaa siirtyvän lämpötehon määrää pinta-alayksikköä kohti, kun pintojen välillä on jokin lämpötilaero. Suurempi kerroin tarkoittaa tehokkaampaa lämmönsiirtoa. Lämmönsiirtokertoimen yksikkö on $W/(K \cdot m^2)$ tai $W/(^{\circ}C \cdot m^2)$.

Lämmönsiirtokertoimen laskemiseksi on laskettava Reynoldsin- ja Nusseltin luvut. Reynoldsin luvulla voidaan päätellä onko virtaus laminaarista vai turbulenttia. Mitä suuremman arvon Reynoldsin luku saa, sitä turbulentimpaa virtaus on. Turbulentilla virtauksella saadaan aikaan parempi lämmönsiirto. Reynoldsin luku lasketaan kaavalla 11.

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (11)$$

missä

- V on virtauksen nopeus, m/s
- L on virtausta luonnehtiva pituus, esimerkiksi pallolla tai putkella halkaisija D
- ν aineen kinemaattinen viskositeetti

Täytekappaletornissa luonnehtivana pituutena käytetään täytekappaleen pinta-alaa vastaavan pallon muotoisen kappaleen halkaisijaa. (Wagner 1994, 150)

Seuraava vaihe konvektion lämmönsiirtokertoimen laskemisessa on Nusseltin luvun määrittäminen. Nusseltin luku kuvaa konvektion ja johtumisen suhdetta. Suuri Nusseltin luku tarkoittaa että suuri osa lämmönsiirrosta tapahtuu konvektiolla. (Cengel, Ghajar. 276). Nusseltin luku pallomaiselle kappaleelle lasketaan kaavalla 12.

$$Nu_{sph} = 2 + \left(0,4 * Re^{\frac{1}{2}} + 0,06 * Re^{\frac{2}{3}} \right) * Pr^{0,4} * \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

missä

- Re on Reynoldsin luku
- Pr on Prandtin luku
- μ_s on keskimääräinen dynaaminen viskositeetti täytekappalepedissä
- μ_{∞} on savukaasun dynaaminen viskositeetti

(Cengel, Ghajar 435)

Viskositeetti μ_s saavukaasun viskositeetti täytekappaleen pinnan lämpötilassa. Taulukoitua arvoa etsittäessä lämpötilana on käytetty kastepisteen ja pesurista poistuvan lämpötilan keskiarvoa. Vapaan virtauksen viskositeetti μ_{∞} saadaan savukaasuvirtauksen tulolämpötilan ja saavukaasujen kastepisteen avulla.

Prandtin luku on jokaiselle aineelle ominainen dimensioton suure joka muuttuu lämpötilan muuttuessa. Luvulle on tehty taulukoita, joista se saadaan määritettyä halutulle aineelle halutussa lämpötilassa.

Konvektion lämmönsiirtokerroin voidaan laskea kaavalla 13.

$$h_{conv} = Nu * \frac{k}{D} \quad (13)$$

missä

- Nu on nusseltin luku
- k on ilman lämmönsiirtokerroin
- D täytekappaleen pinta-alaa vastaavan pallon halkaisija

Kaavoissa esiintyvät ilman ominaisuudet, joita on sovellettu savukaasuun, on saatu valmiista taulukoista. (Cengel, Ghajar. 884)

Täytekappalepedin alaosassa lämmönsiirto tapahtuu konvektiolla siihen asti kunnes savukaasujen lämpötila laskee kattilan jälkeisestä lämpötilasta kastepisteeseen, jonka jälkeen suurin osa lämmönsiirrosta syntyy vesihöyryn lauhtumisesta. Kun lasketaan savukaasujen luovuttama lämpöenergia lämpötilavälillä 250°C-66,8°C, voidaan konvektion lämmönsiirtokertoimen avulla laskea tarvittava täytekappalepedin kokonaispinta-ala, tilavuus ja korkeus. Seuraavalla kaavalla laskettava lämpöteho on suurin mahdollinen konvektiolla, siis ilman lahtumista, saatava lämpöteho. Savukaasujen konvektiolla luovuttama lämpöenergia lasketaan kaavalla 14.

$$\dot{Q} = c_p * \dot{m} * \Delta T \quad (14)$$

missä

- c_p on ilman (savukaasujen) ominaislämpökapasiteetti
- \dot{m} on savukaasujen massavirta
- ΔT savukaasujen lämpötilanmuutos

Täytekappalepedin kokonaispinta-ala saadaan laskettua kaavalla 15.

$$A_s = \frac{\dot{Q}}{h_{cond} * \Delta T_{lm}} \quad (15)$$

missä

- ΔT_{lm} on logaritminen lämpötilaero savukaasu- ja kiertovesivirtausten välillä

Logaritminen lämpötilaero lasketaan kaavalla 16.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (16)$$

- ΔT_1 on savukaasun tulolämpötilan ja savukaasupesurista poistuvan veden halutun lämpötilan ero
- ΔT_2 on poistuvien savukaasujen lämpötilan (savukaasujen kastepisteen lämpötila) ja pesuriin tulevan kiertoveden lämpötilan ero

8 Lämmönsiirto lauhtumalla

8.1 Savukaasujen kosteus

Savukaasujen sisältämän vesihöyryn määrä voidaan ilmoittaa absoluuttisena kosteutena, yksikkönä g/m³ tai suhteellisena kosteutena. Suhteellinen kosteus on absoluuttisen kosteuden suhde suurimpaan mahdolliseen absoluuttiseen kosteuteen senhetkisessä lämpötilassa. Kun suhteellinen kosteus on 100%, ”ylimääräinen” vesihöyry lauhtuu takaisin vedeksi.

Suuri savukaasujen suhteellinen kosteus johtaa siihen, että savukaasut lauhtuvat savukaasupesurissa korkeammassa lämpötilassa. Jos palamisilmakanavaan sumutetaan vettä, saadaan palamisilman kosteutta nostettua ja sitä kautta nostettua savukaasujen kosteutta. Palamisilman kostuttimen pohjalle kertyvä vesi, joka ei siirtynyt ilman mukana tulipesään johdetaan savukaasupesurin yläosaan.

Palamisilman kostuttimessa pesurin kiertovesi jäähtyy ja luovuttaa lämpöenergiaansa palamisilmaan toimien myös luvona. Kostutuksella voidaan myös jäähdyttää pesurin kiertovettä, jos kaukolämpöverkon paluulämpötila on korkea.

8.2 Lauhtumisen lämmönsiirtokerroin

Oletetaan että lauhtumisen lämmönsiirtokertoimen laskennassa voidaan käyttää samaa periaatetta kuin konvektiossakin: lämmönsiirrossa määräävänä pituutena on täytekappaleen pinta-alaa vastaavan pallon halkaisija. Tällöin lauhtumisen lämmönsiirtokerroin h_{cond} pallomaiselle kappaleelle lasketaan kaavalla 17.

$$h_{cond} = 0,815 * \left[\frac{g * (\rho_l - \rho_v) * k_l^3}{\mu_l * (T_{sat} - T_s) * D} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (17)$$

missä

- g on putoamiskiihtyvyys
- ρ_l on kylläisen veden tiheys
- ρ_v on kylläisen höyryn tiheys
- k_l on kylläisen veden lämmönjohtavuus
- μ_l on kylläisen veden viskositeetti
- T_{sat} on savukaasujen kastepiste
- T_s on täytekappaleen pintalämpötila
- D on täytekappaleen pinta-alaa vastaavan pallon halkaisija

Täytekappaleen pintalämpötilana on laskuissa käytetty savukaasujen kastepisteen ja kaukolämmön paluuveden keskiarvoa.

9 Lainsäädäntöä

Lainsäädännössä savukaasupesureita käsitellään valtioneuvoston asetuksessa 335/2010. Asetusta sovelletaan polttoaineteholtaan 5-50 MW laitoksiin tai 1-5 MW laitoksiin, joiden laitosalueella olevien energiantuotantoyksiköiden yhteenlaskettu polttoaineteho ylittää 5 MW. Nämä rajaukset rajaavat Tulostekniikka Oy:n toimittamat laitokset suurilta osin pois tämän säädöksen alueelta. Voidaan kuitenkin melko varmasti olettaa että vaatimukset energiantuotannon päästöistä tulevat kiristymään myös pienempien laitosten osalta.

Asetuksen 750/2013 9 §:ssä todetaan seuraavaa:

Toiminnanharjoittajan on selvitettävä energiantuotantolaitoksen jätevesien määrä ja laatu. Jos toiminnassa syntyy tai käytetään aineita, jotka sisältävät vesiympäristölle vaarallisista ja haitallisista aineista annetun valtioneuvoston asetuksen (1022/2006) liitteessä I mainittuja aineita, on varmistuttava, ettei niitä pääse pohjavesiin, vesiympäristöön tai viemäriin.

Viemäriin johdettavat savukaasupesurissa ja savukaasujen lauhdutuksessa muodostuvat jätevedet (lauhdevedet) on ennen johtamista neutraloitava, selkeytettävä ja suodatettava. Vesistöön

johdettavat lauhdevedet on ennen johtamista neutraloitava, selkeytettävä ja suodatettava. Ojaan johdettavat lauhdevedet on ennen johtamista saostettava kemiallisesti, selkeytettävä ja suodatettava.

Valtioneuvoston asetus 1022/2006 käsittelee vesiympäristölle vaarallisia ja haitallisia aineita. Asetuksen liitteessä 1 luetellaan aineita, joiden johtaminen vesistöön on kielletty. Lämpölaitosten kannalta luetelluista aineista merkityksellisimmät ovat elohopea ja kadmium, joita molempia voi esiintyä lämpölaitosten jätevesissä. Erityisesti kadmiumin pitoisuudella voi olla luonnonsuojelullista merkitystä. (Alle 50MW:n lämpölaitosten teollisuusjätevesiselvitys 2008, s 4.)

Viemäriin johdettaville jätevesille annetut vaatimukset vaihtelevat paikkakunnittain. Viemäriverkkoa hallinnoivalla yhtiöllä ei kuitenkaan ole velvollisuutta ottaa vastaan teollisuusjätevesiä. Lisäksi viemäriyhtiön on huolehdittava siitä että vastaanotettujen teollisuusjätevesien ominaisuudet eivät aiheuta häiriötä tai vaaranna viemäriverkon tai puhdistamon toimintaa. Tavanomaiset raja-arvot viemäriin johdettavalle teollisuusjätevedelle on esitetty taulukossa 2.

Pienten lämpölaitosten savukaasupesureissa syntyvän lauhteen raskasmetallipitoisuudet ovat useimmiten niin pieniä että selkeytyksen jälkeen niitä ei juuri pääse viemäriin. (Alle 50MW:n lämpölaitosten teollisuusjätevesiselvitys 2008, s. 6)

Taulukko 2. Tavanomaiset raja-arvot viemäriin johdettavalle teollisuusjätevedelle. (Alle 50MW:n lämpölaitosten teollisuusjätevesiselvitys 2008)

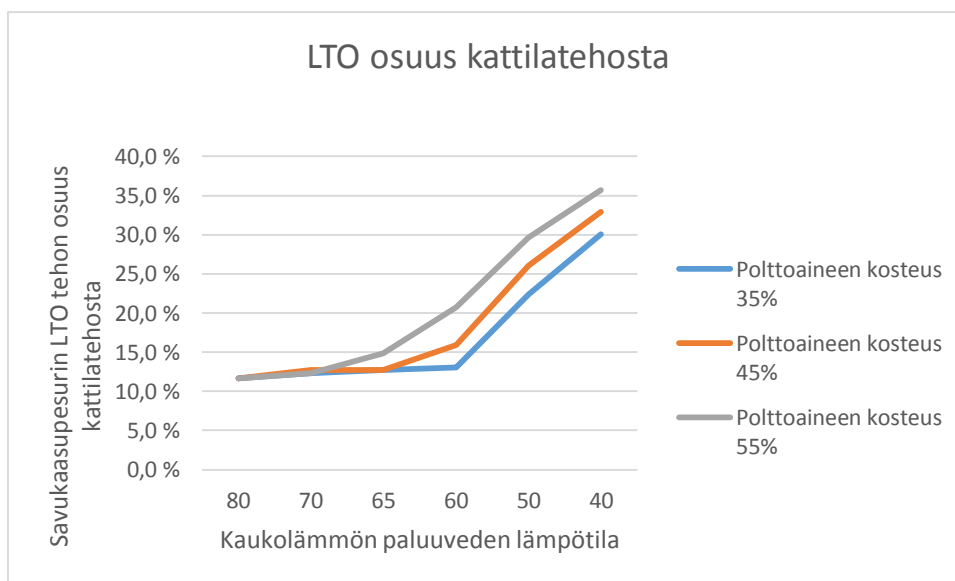
Aine/ominaisuus	Yksikkö	Suurin sallittu arvo
Elohopea, Hg	mg/l	0,01
Hopea, Ag	mg/l	0,2
Kadmium, Cd	mg/l	0,01
Kromi, Cr	mg/l	0,5*
6-arvoinen kromi, Cr ³⁺	mg/l	0,1
Kupari, Cu	mg/l	0,5*
Lyijy, Pb	mg/l	0,5
Nikkeli, Ni	mg/l	0,5
Sinkki, Zn	mg/l	2,0*
pH	mg/l	6,0 - 11,0
Lämpötila	°C	40
Arseeni, As	mg/l	0,1
Tina, Sn	mg/l	2,0
Rasva	mg/l	Tapauskohtaisesti
Kokonaishiilivetypitoisuus	mg/l	200
Kiintoaine	mg/l	500 - 800

10 Lämmön talteenotto 2,5 MW:n esimerkklaitoksessa

Kannattavuuslaskelmissa esimerkkinä 2,5 MW KPA-laitosta, joka käyttää polttoaineenaan puuhaketta (kosteus 50 %), KL paluuveden lämpötila on 50 °C. Huipunkäyttöaika 2100h. Polttoaineen hinta saadaan oheisesta taulukosta. (Bioenergia lehti. nro. 2/2014) Lämmöntalteenoton osuus nähdään kuvioista 10

POLTTOAINEIDEN HINTATASO eivät sisällä arvonlisäveroa, mutta sisältävät valmisteverot ja huoltovarmuusmaksut Joulukuu 2014						
Polttoaine	A Kuluttajahinta	B Verot ja maksut euro/MWh	Polttoaineen hinta lämmön tuotannossa (sisältävät valmisteverot ja huoltovarmuusmaksun eli sarakkeen B)			
			C - Polttoaineen hinta		D 3 kk:n liukuva keskiarvo euro/MWh	E 12 kk:n liukuva keskiarvo euro/MWh
			euro/GJ	euro/MWh		
Raskas polttoöljy ¹⁾	512,7 euro/t	16,83	12,5	44,9	50,7	57,8
Kevyt polttoöljy ²⁾	64,9 sentti/l	18,95	18,0	64,8	77,1	82,6
Maakaasu ³⁾	44,1 euro/MWh	11,46	12,2	44,1	44,4	44,9
Kivihiili ⁴⁾						
- keskihinta cif	66,2 euro/t	0,0	2,6	9,5	9,4	9,0
- rannikkolaitoksella ⁵⁾	201,3 euro/t	18,99	8,0	28,8	28,7	28,3
- kuljetus noin 100 km	208,0 euro/t	18,99	8,3	29,8	29,7	29,3
Jyrsinpolttoturve ⁶⁾						
- kuljetus noin 50 km	18,2 euro/MWh	4,9	5,0	18,2	18,1	18,1
- kuljetus noin 100 km	18,8 euro/MWh	4,9	5,2	18,8	18,7	18,8
Palaturve ⁶⁾						
- kuljetus noin 50 km	22,7 euro/MWh	4,9	6,3	22,7	22,7	22,6
- kuljetus noin 100 km	23,6 euro/MWh	4,9	6,6	23,6	23,6	23,5
Metsähake ⁷⁾	21,2 euro/MWh	0,0	5,9	21,2	21,1	21,1
Puupelletti ⁸⁾	37,1 euro/MWh	0,0	10,3	37,1	37,0	37,2

Pesurin LTO-tehon osuus saadaan arvioitua kuvasta 11.



Kuvio 10. KL-veden paluulämpötilan ja polttoaineen kosteuden vaikutus lämmöntalteenottoon (Liite 1)

Savukaasupesurin hinta-arvioita kysyttiin kolmelta kotimaiselta valmistajalta sähköpostitse. Yrityksistä yksikään ei vastannut yhteydenottoihin, tästä syystä hinta-arvio perustetaan Energiategollisuus ry:n selvitykseen kotimaista

polttoainetta käyttävien 0,5-30MW kattilalaitosten teknisistä ratkaisuista sekä palamisen hallinnasta.

Taulukko 4. Savukaasun puhdistuslaitteiden tunnuslukuja (Mts. 22)

Puhdistuslaite	Polttoaine	Teho MW _{pa}	Investointi €/MW _{pa}	Käyttökust. €/MWh _{pa}	Päästöaso mg/m ³ n	Painehäviö mbar
Sähkösuodatin	kaikki	alle 5	40 000	ei tietoa	15–50	2–3
	kaikki	5–50	20 000	0,1		
	kaikki	50–150	15 000	ei tietoa		
	kiinteä ja lipeä	> 150	10 000	ei tietoa		
	neste	> 150	7 000	ei tietoa		
Kuitusuodatin	kaikki	5–50	18 000	0,3	5–25	10–20
	kiinteä	> 150	13 000	0,2		
	neste	> 150	10 000	ei tietoa		
Pesuri + LTO	kaikki	5–50	35 000	0,3	50–500	10–15
Pesuri	kaikki	5–300	60 000	0,5	50–500	10–15
	kaikki	300–1 000	80 000	0,3		
	kaikki	yli 1 000	40 000	ei tietoa		
Sykloni / multi-sykloni	kaikki	alle 5	6 000	ei tietoa	20–1500	10–20
	kaikki	5–50	1 600	0,1		

$$\frac{(PA\ hinta\ (€/MWh))}{1000\ kWh/MWh} * LTO\ osuus * kattilateho\ (kW) * huipunkäyttöaika$$

$$= \text{vuotuinen säästö}$$

$$\frac{(21,2\ €/MWh)}{1000\ kWh/MWh} * 0,25 * 2500kW * 2100h = 33000\ €/a$$

Tällöin takaisinmaksuajaksi muodostuu noin 2 vuotta ja 8 kuukautta.

Laitoksen huipunkäyttöaika, 2100h, on saatu energiateollisuus ry:n Kaukolämmön käyttötaloudelliset tunnusluvut 2012 – julkaisusta. On kuitenkin huomattava että tällä tavalla laskettaessa laitos kävisi nimellistehollaan 2100 tuntia vuodessa. Savukaasupesuri toimii parhaiten laitoksen nimellistehon alueella, mutta pesuria ei käytetä ympäri vuoden.

Kylmimpinä aikoina lämpöyrittäjät pyrkivät käyttämään mahdollisimman hyvälaatuista (kuivaa) polttoainetta. Savukaasupesurilla saadaan hyödynnettyä kostea polttoainettakin tehokkaasti, mutta kostea polttoaine voi kovalla pakkasella aiheuttaa ongelmia jäätymisen takia.

Oletus siitä että LTO-teho olisi 25% kattilatehosta on tehty sen mukaan että olosuhteet ovat suotuisat pesurin toimintaa ajatellen. Voidaan olettaa että lämmöntalteenotto jää pienemmäksi erilaisten häiriöiden vuoksi. Häiriöitä ovat esimerkiksi likaantuneet täytekappaleet, likaantuneet tai tukkeutuneet pesukierron ruiskusuuttimet tai liian korkea kaukolämmön paluuveden lämpötila. Kuitenkin vaikka LTO-tehoksi oletettaisiin 15% kattilatehosta saataisiin takaisinmaksuajaksi alle 6 vuotta. Näiden laskelmien perusteella savukaasupesuri vaikuttaa kannattavalta investoinnilta.

11 Savukaasupesurin huolto

Savukaasupesurin rakenteisiin, täytekappaleisiin, pumppuihin, putkistoihin ja lämmönvaihtimeen kertyy tuhkalietettä savukaasupesurin ollessa käytössä. Suurin osa pesuriin asti päässeistä hiukkasista on tarkoitus saada saostumaan pesurin pohjalle. Väistämättä osa tuhkalietteestä päätyy vesikierron veden mukana täytekappalepatjan päälle ja lämmönvaihtimeen.

Savukaasupesuri on oltava mahdollista ohittaa siten että savukaasut poistuvat piippuun ja kaukolämmön paluuvesi menee suoraan kattilaan. Tällöin pesuri voidaan huoltaa ilman katkosta lämmöntuotantoon. Suurimmat huollot kannattaa ajoittaa kesälle, jolloin kaukolämmön kulutus on pieni. Ehdotus huoltojen ajoituksesta taulukossa 5.

Taulukko 5. ehdotus savukaasupesurin huoltojen ajoituksesta

	Viikoittain	Puolen vuoden välein	Kerran vuodessa
Lämmönvaihtimen vastavirtahuuhtelu	X		
Lämmönvaihtimen CIP-puhdistus/purkaminen		X	
Pesutornin ja putkistojen happopesu		X	
Täytekappaleiden pesu			X

11.1 Pesutornin ja putkistojen huolto

Pesutorni ja pesukierron putkistot ja suuttimet on huollettava silloin kun kaukolämmön kulutus on pieni ja/tai kun käytössä on kuivaa, hyvälaatuista polttoainetta. Pesun aikana pesuri on poissa käytöstä varsin pitkään.

Huolto aloitetaan erottamalla savukaasupesuri kattilalaitoksen prosessista. Suoraan savupiippuun johtavat savukaasupellit avataan ja pesuriin menevät suljetaan. Pesurin lämmönvaihdin erotetaan kaukolämpöverkosta. Lisäksi lämmönvaihdin erotetaan pesukierrosta ja avataan lämmönvaihtimen ohituslinja, jonka avulla pesukierron vesi ohjataan suoraan pumpulta pesurin yläosaan. Kun tarvittavat erotukset on tehty, pumpataan savukaasupesurin pohjalla oleva tuhkaliete ja vesi pois. Tämän jälkeen pesurin miesluukut avataan.

Pesurin pesusuuttimista ja pohjasta pestään tuhkaliete pois esimerkiksi painepesurilla. Samalla pestään savukaasupesurin täytekappalepedin yläpuolella oleva pisaranerotin painepesurilla. Tämän jälkeen pesuri täytetään vedellä normaaliin pinnankorkeuteen ja pesukiertoon lisätään puhdistusta tehostamaan tarkoitukseen sopivaa happoa. Esimerkiksi muurahaishappoa tai sulfamiinihappoa. Tämä jälkeen pesukierron pumppu käynnistetään ja kierrätetään happoliuosta kierrossa.

Kun pesu on suoritettu, poistetaan pesuliuos pesurista tilanteeseen sopivalla tavalla. Tarkoitukseen sopii liuoksen johtaminen neutraloinnin jälkeen viemäriin tai liuoksen poistaminen imuautolla. Tämä jälkeen pesuria huuhdellaan vedellä niin kauan että liuoksen pH nousee sallittuihin rajoihin. Lopuksi huuhteluun käytetty vesi lasketaan viemäriin ja pesuri täytetään normaalikäyttöä varten uudelleen.

11.2 Täytekappaleiden puhdistus

Täytekappalaiden pinnalle kertynyt tuhkalietekerros pienentää lämmönsiirtoon käytettävää pinta-alaa ja haittaa savukaasun virtausta pedin lävitse. Osa lietteestä saadaan poistettua pesutornin happopesun aikana, mutta erillinen täytekappaleiden pesu voi olla tarpeen.

Pesua varten kappaleet on poistettava pesurista, joten pesuri on erotettava prosessista. Täytekappaleet voidaan pestä esimerkiksi jakamalla täytekappaleet pienempiin eriin ja levittämällä ne sopivalle alustalle, esimerkiksi traktorin perävaunun lavalle, jossa ne pestään painepesurilla.

11.3 Lämmönvaihtimen puhdistus

Yksinkertaisin tapa puhdistaa lämmönvaihdin on johtaa sen lävitse vettä väärään suuntaan. Tämä ei kuitenkaan poista kaikkea vaihtimeen jäänyttä lietettä, vaan on lähinnä ennaltaehkäisevä toimenpide.

Varsinaiseen puhdistus voidaan tehdä ns. cleaning in place (CIP) – menetelmällä, jossa erityisellä puhdistuslaitteella kierrätetään pesuliuosta lämmönvaihtimen läpi. Tämä puhdistustapa vaatii puhdistuslaitteelle putkiyhteet lämmönvaihtimesta lähteviin putkiin ja itse pesulaitteen hankkimisen, vuokrauksen tai ulkopuolisen palveluntarjoajan hankkimista.

Pesu voidaan myös suorittaa purkamalla lämmönvaihdin osiin.

Lämmönvaihdin puretaan valmistajan ohjeiden mukaan, jonka jälkeen vaihtimen levyjen pinnat puhdistetaan. (APV Tiivisteelliset levylämmönvaihtimet. 2009.)

11 Pohdintaa ja johtopäätökset

Laskennan mukaan savukaasupesurin hankinta polttoaineteholtaan alle 5 MW:n KPA laitokseen vaikuttaa energiataloudellisesti kannattavalta. Pesurilla

saadaan otettua talteen savukaasujen hukkalämpöä talteen energiamäärä joka vastaa 10-25 % kattilan lämpötehosta.

Savukaasupesurilla varustettu lämpökeskus voi lisäksi käyttää polttoaineenaan huonolaatuisempaa, toisin sanoen kosteampaa, polttoainetta tehokkaasti. Tämä on eduksi haketta polttoaineenaan käyttävissä laitoksissa. Energiapuupinoja ei tarvitse kuivattaa yhtä kauan, koska polttoaineen sisältämän veden haihdutukseen kuluva energia saadaan pesurilla hyötykäyttöön. Jos energiayritys ostaa polttoaineensa ulkopuolelta kannattavuus paranee, sillä polttoaineesta maksetaan sen alemman lämpöarvon mukaan.

Lukujen 6, 7 ja 8 mukaan tehtyjen laskelmien mukaan vaikuttaa siltä että savukaasupesuri ei sovellu käytettäväksi sellaisessa laitoksessa joka käyttää pääasiallisena polttoaineenaan pellettiä. Koska savukaasupesurin lämmöntalteenottokyky perustuu suurilta osin veden lauhtumiseen, aiheuttaa hyvin kuiva polttoaine, kuten esimerkiksi pelletti, sen että savukaasupesurilla ei saavuteta suurinta mahdollista tehokkuutta.

Muuten käytetyllä polttoaineella ei juuri ole merkitystä. Puuhakkeen ja palaturpeen kuiva-ainekoostumuksessa ei ole merkittävää eroa. Molemmat sisältävät lähes saman verran palaessaan vettä muodostavaa vetyä. Turpeen poltossa kuitenkin pesurin käyttökustannukset nousevat hieman, sillä rikkipitoisen turpeen poltossa syntyy rikkihappoa, jolloin tarvitaan enemmän lauhteen neutralointiin tarvittavaa kemikaalia.

Nykyinen ympäristölainsäädäntö ei juuri aseta erityisiä vaatimuksia savukaasupesurissa syntyville jätevesille, jos laitoksen polttoaineteho on alle 5 MW. Jos jätevesi lasketaan viemäriin, antaa paikallinen vesi- tai viemärilaitos omat määräyksensä koskien viemäriin johdettavan jäteveden lämpötilaa, pH:ta ja kiintoainetta.

11.1 Työn itsearviointia

Energian talteenoton arviot osuvat samaan suuruusluokkaan kuin savukaasupesureita toimittavat yrityksetkin arvioivat. Pitää kuitenkin huomata

että nämä arviot on tehty myynnin edistämiseksi, joten toteutunut lämmöntalteenotto savukaasuista jäänee alhaisemmaksi.

Käytetty lähdemateriaali jäi suppeahkoksi teorian pohjautuessa suurilta osin Huhtisen Höyrykattilatekniikka-oppikirjaan. Muissa lähteissä savukaasupesuria tarkasteltiin lähinnä teoreettisesti, eikä käytännön kokemuksiin perustuvaa lähdemateriaalia ollut kovin paljoa käytettävissä. Theseus-opinnäytetyötietokannasta kuitenkin löytyi muutama savukaasupesurin käyttöön ja kunnossapitoon liittyvä opinnäytetyö, joskin näidenkin teosten teoria tukeutuu vahvasti edellä mainittuun Huhtisen oppikirjaan.

Jyväskylän Ammattikorkeakoulun ohjeistuksen mukaan opinnäytetyössä tulisi käyttää myös vieraskielistä materiaalia. Tämän opinnäytetyön osalta se toteutui lämmönsiirron teoriaosuuteen käytetyssä lähteissä. Tämäkin lähde teos on kuitenkin laajalti käytössä oleva Cengelin ja Ghajarin kirjoittama oppikirja. Tässä oppikirjassa ei kuitenkaan käsitelty lämmönsiirtoa täytekappalepedissä lainkaan. Sitä laskettaessa on yhdistelty teoriaa Cengelin ja Ghajarin Heat and mass transfer – Fundamentals and applications – teoksesta ja Wagnerin Lämmönsiirto – teoksesta. Heat and mass transfer – Fundamentals and applications on kuitenkin teoksista huomattavasti uudempi.

Englanninkielistä kirjallisuutta, jossa savukaasupesuria olisi käsitelty lämmön talteenottolaitteena ei löytynyt. Tätä selittänee se että savukaasupesuri toimii siihen tarkoitukseen parhaiten silloin, kun polttoaineena käytetään kosteaa puuhaketta tai turvetta. Muualla maailmassa näillä polttoaineilla ei ole yhtä vahvaa asemaa kuin Suomessa.

Tehty opinnäytetyö kuitenkin vastaa kysymyksiin pesurin kannattavuudesta ja polttoaineiden merkityksestä. Lisäksi huomattiin että pesurin hyöty ei rajoitu hukkalämmön talteenotosta saatuihin säästöihin, vaan pesurilla on muitakin etuja.

Pesurin kehittäminen valmiiksi tuotteeksi vaatii vielä työtä. Tässä opinnäytetyössä ei laadittu piirustuksia eikä 3D-malleja. Opinnäytetyö antaa kuitenkin hyvät lähtökohdat jatkokehitystyötä varten. Lämmönsiirron

mallintamisen onnistumisesta saadaan tieto vasta sitten kun mahdollinen prototyyppi on tulevaisuudessa rakennettu.

Lähdeluettelo

Alle 50MW:n lämpölaitosten teollisuusjätevesiselvitys, 2008. Energiateollisuus ry.

APV Tiivisteelliset levylämmönvaihtimet. 2009. Levylämmönvaihtimien käyttö- ja huolto-ohje. Viitattu 1.6.2015

http://www.spx.com/en/assets/pdf/PHE_Manual_1000E_FI_tcm11-7528.pdf

Cengel, Y. Ghajar, A. n.d. Heat and mass transfer – Fundamentals and applications. McGraw-Hill

Huhtinen, M. 2000. Höyrykattilatekniikka. Edita

Jalovaara, J. Aho, J. Hietamäki, E. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka 5-50MW polttolaitoksissa Suomessa. Suomen ympäristökeskus

Järvenreuna J. ja Nummila M. Nykyaikainen savukaasupesuri – merkittävä biolämpölaitosten kannattavuuden parantaja. Caligo Industriän nettisivusto. n.d. Viitattu 18.4.2015.

http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf

Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5-30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. 2012. Energiateollisuus/Ympäristöministeriö

Ohlström, M. 1998. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. VTT tiedotteita.

Wagner, W. 1994. Lämmönsiirto. 2. uud. p. Painatuskeskus